



УДК 621.397

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-298-314>

БЕЗОПАСНОСТЬ

# Системы видеонаблюдения на железнодорожном транспорте

*Ивашевский Михаил Романович – ОАО «РЖД», Москва, Россия\*.***Михаил ИВАШЕВСКИЙ**

Статья посвящена анализу способов повышения безопасности движения поездов. Одним из путей снижения аварийности на железной дороге является своевременное обнаружение опасных объектов и оповещение всех участников движения, прежде всего машиниста. Подобное оповещение возможно реализовать с помощью системы интеллектуального видеонаблюдения (СИВ). Цель статьи – исследовать возможности использования СИВ для повышения безопасности движения поездов. Метод (способ достижения цели) состоит из нескольких этапов: разработка критериев соответствия функциональных возможностей СИВ задачам повышения безопасности движения поездов, оценка и расчёт допустимых значений критериев соответствия.

В работе предложена схема организации СИВ на базе волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) и сети передачи данных, отмечены достоинства и недостатки СИВ, сфор-

мулированы требования к ней. Достоинством видеонаблюдения является наличие видеоинформации об объекте у машиниста поезда, позволяющей своевременно предотвратить аварию. Недостатком СИВ является высокая вероятность ложного обнаружения, которая может привести к ложным срабатываниям системы.

Для снижения числа ложных срабатываний существуют два пути: совершенствование алгоритмов видеоаналитики в устройстве распознавания (УР) и повышение качества видеосигналов на входе УР. Работа посвящена снижению вероятности ложного срабатывания за счёт улучшения качества связи. Отмечено, что эффективным методом является использование новой элементной базы электроники на базе наноструктурированных материалов. Такие материалы позволяют улучшить оптоэлектронные характеристики основных элементов СИВ: фотосенсоров и фотоприёмников.

**Ключевые слова:** транспорт, безопасность движения, видеонаблюдение, видеоаналитика, фотосенсор, цифровой шум, погрешность распознавания, оптоэлектроника, вероятность ошибки.

\*Информация об авторе:

**Ивашевский Михаил Романович** – администратор телекоммуникационных ресурсов 1 категории Центра управления телекоммуникационными ресурсами (ЦУТК) структурного подразделения Центральной станции связи (ЦСС) – филиала ОАО «РЖД», аспирант кафедры автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, [misha\\_13@mail.ru](mailto:misha_13@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 15.08.2019, принята к публикации 21.10.2019.

**For the English text of the article please see p. 307.**

## АКТУАЛЬНОСТЬ

Железнодорожный транспорт во всём мире признан самым безопасным видом транспорта. Однако статистика аварий высока [1]. Самые частые последствия аварий — наезды подвижного состава на автотранспорт и пешеходов. Это происходит в местах отсутствия защитных ограждений железнодорожных путей, особенно на участках скоростного движения, а также на переездах из-за нарушений правил пересечения железной дороги [2].

Существуют несколько кардинальных способов предотвращения аварий на переездах: устранение одноуровневого пересечения железнодорожного полотна и автомобильной дороги; сокращение числа переездов; своевременное предупреждение водителей о приближающемся поезде, а в случае возникновения опасной ситуации своевременное обнаружение посторонних объектов и оповещение специальных служб железной дороги и прежде всего, машиниста приближающегося поезда [3; 4].

Первый вариант — очень затратный и применение его обосновано только для дорог с интенсивным движением транспорта. Второй ухудшает социальную и транспортную инфраструктуру, сообщение между близлежащими населёнными пунктами. Третий путь своевременного оповещения всех участников движения является наиболее целесообразным. Такое оповещение можно реализовать с помощью технических средств систем интеллектуального видеонаблюдения (СИВ) [5, с. 40—44].

Основная идея концепции «умного переезда» — создание интеллектуальной системы мониторинга, способной выявлять потенциально опасные объекты, отслеживать перемещение объекта в заданной зоне наблюдения и информировать о наличии потенциальной угрозы всех участников перевозочного процесса, прежде всего машиниста.

В последние несколько лет на железных дорогах Европейского союза, Японии, Северной Америки ведутся работы по улучшению существующих систем оповещения на железнодорожных переездах за счёт внедрения передовых технологий связи, видеонаблюдения и обработки изображе-

ний. Подобная концепция получила название «умный переезд» (smart railroad crossing) [6].

Так, в Великобритании на железной дороге компании Network Rail при участии операторов связи Amplicon и TEW Plus Ltd внедряется система видеонаблюдения, обеспечивающая автоматическое сканирование и обнаружение препятствий на переезде [7].

В ЕС, в рамках проекта SELCAT (Safer European Level Crossing Assessment and Technology), направленного на минимизацию воздействия человеческого фактора как основной причины аварий, сформирована стратегия для контроля и снижения рисков на переезде. Предложенное решение заключается в обнаружении препятствия (на переезде) за счёт использования технологии видеонализа. Это решение интегрирует другие современные технологии, такие, как использование спутниковой связи и систем радиопередачи.

Примером использования данной технологии является Германия: на железнодорожных переездах устанавливается камера с функцией внутренней видеоаналитики. Поступающая информация обрабатывается диспетчером, который может запретить проезд поезда в случае обнаружения препятствия. Одним из производителей, разработавших такую систему безопасности, является компания Alstom [8].

Компания ОАО «РЖД» также реализует передовые цифровые технологии. Так в 2019 году была принята долгосрочная программа развития холдинга, предусматривающая переход на «Цифровую железную дорогу». Концепция «Цифровой железной дороги» заключается в полной интеграции интеллектуальных коммуникационных технологий между пользователем, транспортным средством, системой управления движением и инфраструктурой [9].

Видеонаблюдение широко используется на железнодорожном транспорте в РФ и за рубежом для различных целей, главной из которых является охрана объектов. Функция повышения безопасности движения поездов отличается критериями и оценками эффективности СИВ.

Внедрение новых систем оповещения является перспективным направлением повышения безопасности движения.



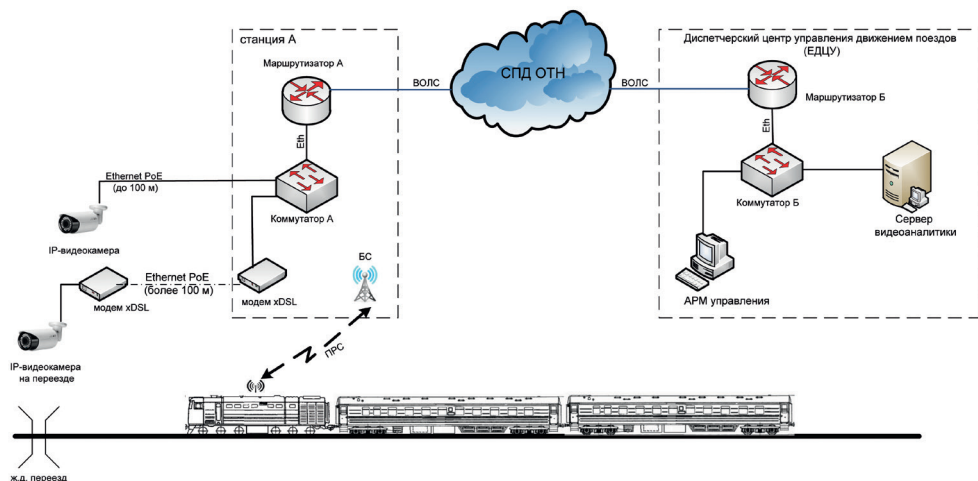


Рис. 1. Организации СИБ на железнодорожном транспорте.

## ЦЕЛЬ И МЕТОД

Цель данной работы заключается в рассмотрении вопроса возможности использования систем видеонаблюдения для повышения безопасности движения. Метод решения этой задачи состоит из нескольких этапов:

- 1) разработка критериев соответствия СИБ задачам повышения безопасности движения;
- 2) разработка методики оценки критериев соответствия;
- 3) расчёт допустимых значений критериев.

В статье предлагаются два критерия соответствия СИБ задачам повышения безопасности движения на железнодорожном транспорте:

- 1) качество видеосигнала;
- 2) достоверность полученной информации.

Первый критерий характеризует канал связи и оценивается приведённой дисперсией суммарной погрешности  $\delta^2_{\Sigma}$ . Второй критерий характеризует алгоритмы распознавания (видеоаналитику) СИБ и оценивает вероятностями правильного и ложного обнаружений.

Такая оценка критериев соответствия согласуется с показателями функциональной безопасности на железнодорожном транспорте (ГОСТ 33358-2015 «Системы управления и обеспечения безопасности движения поездов»).

Для расчёта допустимых значений оценок качества и достоверности сигнала

лов СИБ (критериев) в работе вводится понятие функции потерь (величина экономического ущерба, который наступает в результате пропуска или ложного обнаружения опасного объекта).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Вариант организации системы интеллектуального видеонаблюдения на железнодорожном транспорте

Простейшая СИБ предусматривает: установку видеокамер на переездах, передачу видеосигнала на видеосервер единого диспетчерского центра управления (ЕДЦУ), распознавание опасных объектов с помощью видеоаналитики, передача команд торможения на локомотив из ЕДЦУ посредством поездной радиосвязи (ПРС). Схема организации СИБ представлена на рис. 1.

В качестве сетевой инфраструктуры использована сеть передачи данных общетехнологического назначения (СПД ОТН) ОАО «РЖД». СПД ОТН отвечает требованиям по пропускной способности, предъявляемой к каналам связи. СПД ОТН является сетью передачи данных на основе протокола TCP/IP. В качестве направляющих линий от сетевого элемента до видеокамеры на объекте наблюдения можно применить медножильный кабель, либо волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС). В случае подключения по медножильному кабелю на расстояние более 100 м требуется применение модемов xDSL

(цифровая абонентская линия). Питание оборудования видеонаблюдения возможно организовать по технологии Power over Ethernet (PoE) [10].

Достоинством видеонаблюдения является наличие видеoinформации об объекте у машиниста поезда, позволяющей своевременно предотвратить аварию. Однако системы СИВ имеют существенный недостаток: высокую вероятность ложного обнаружения  $P_{\text{лож.обн.}} \geq 10^{-3}$ , которая может привести к необоснованным командам экстренного торможения и, как следствие, к тяжёлым последствиям в виде травм пассажиров, нарушению графика движения поездов и т.д. Одна из причин ложных обнаружений — в недостаточно высоком качестве формирования цифрового видеосигнала [11, с. 24–29].

Для снижения числа ложных срабатываний существуют два пути: совершенствование алгоритмов видеоаналитики в устройстве распознавания (УР) и повышение качества видеосигналов на входе УР. Работа посвящена снижению вероятности ложного срабатывания за счёт улучшения качества связи. Недостаточно высокое качество формирования цифрового видеосигнала оказывает существенное влияние на эффективность распознавания опасных объектов. Поэтому главными задачами, связанными с внедрением СИВ, являются оценка качества передачи видеосигналов и разработка путей снижения вероятности ложного обнаружения.

Самым эффективным способом снижения вероятности ложного обнаружения является использование новой элементной базы электроники на наноструктурированных материалах, которые позволяют значительно улучшить оптоэлектронные характеристики фотосенсоров (ФС) и фотоприёмников (ФП). Следует отметить, что при использовании в качестве линий связи волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) искажения видеосигналов за счёт хроматической и поляризационной дисперсий (при условии постоянного мониторинга) имеют значения на два порядка ниже, чем от ФС и ФП [12].

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение поставленной задачи состоит из нескольких этапов:

1) выбор и обоснование критериев оценки соответствия количественных и качественных характеристик СИВ требованиям безопасности на железнодорожном транспорте. В качестве функции потерь выбраны экономические убытки железных дорог из-за аварий на переездах, которые позволили получить допустимые значения  $P_{\text{лож.обн.}}$ ,  $P_{\text{пр.обн.}}$ ;

2) разработка методик оценки количественных и качественных показателей эффективности СИВ на железнодорожном транспорте;

3) определение допустимых значений показателей функционирования СИВ исходя из условий работы железнодорожного транспорта и с учётом функции потерь;

4) разработка предложений по повышению эффективности СИВ (за счёт элементной базы электроники нового поколения на наноструктурах);

5) расчёт величины выигрыша по показателям оценки эффективности СИВ (приведённой дисперсии суммарной погрешности и вероятности правильного обнаружения) для двух элементных баз: микроэлектроники и наноэлектроники.

Реализация каждого этапа основывается на исследованиях особенностей работы ФС и ФП, их оптоэлектронных характеристик и влияния на них полупроводникового материала.

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

В качестве критериев эффективности СИВ для повышения безопасности движения поездов следует выбрать показатель качества сигналов видеонаблюдения (отношение мощностей сигнала и шума) и показатель достоверности, оцениваемый вероятностью правильного обнаружения опасных объектов.

Для анализа эффективности СИВ необходимо разработать следующие методики:

1. Методика расчёта показателя качества, которая включает:

1) оценку качества сигналов СИВ с помощью приведённой суммарной дисперсии



Экономический ущерб от аварии на железнодорожном переезде

Наезд поезда на объект в результате пропуска опасной ситуации		Экстренное торможение в результате ложного обнаружения объекта	
Описание последствий происшествия	Описание расходов	Описание последствий происшествия	Описание расходов
1. Тяжёлое, либо лёгкое ранение человека. Смерть человека	а) лечение в больнице; б) реабилитация; в) выплаты пособий по утрате трудоспособности, либо компенсация семье погибшего	1. Тяжёлое ранение, либо лёгкое человека	а) лечение в больнице; б) реабилитация; в) выплаты пособий по утрате трудоспособности
2. Полная утрата или повреждение объекта хозяйствования (например, автомобиль)	Стоимость объекта хозяйствования, стоимость ремонта, стоимость утилизации, компенсация по страхованию	2. Повреждения внутреннего оснащения вагонов, конструктивных элементов систем торможения и др.	Стоимость восстановления повреждённого оборудования вагонов и всего поезда в целом
3. Нарушение графика движения поездов	Ущерб от нарушения производственных связей предприятий, пользующихся услугами транспортной системы; ущерб от снижения эффективности работы транспортной системы	3. Порча груза (багажа)	Стоимость груза (багажа), компенсация по страхованию
		4. Нарушение графика движения поездов	Ущерб от нарушения производственных связей предприятий, пользующихся услугами транспортной системы; ущерб от снижения эффективности работы транспортной системы

текущей погрешности  $\delta^2_{\epsilon}$ , учитывающей искажения сигнала фотосенсором, линией связи и фотоприёмником (обратной величине сигнал/шум);

2) оценку качества сигналов СИВ на выходе фотосенсора с помощью приведённой дисперсии аномальной погрешности  $\delta^2_{\text{фс}}$ , возникающей за счёт внутренних шумов пикселей;

3) оценку качества сигналов СИВ на выходе ФП с помощью приведённой дисперсии аномальной погрешности  $\delta^2_{\text{ан}}$ , возникающей за счёт теплового шума фотоприёмника.

2. Методика расчёта показателя достоверности сигналов СИВ с помощью вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{пр.обн}}$ , осуществляемой на основании критерия Неймана–Пирсона.

3. Методика обоснования предложений по повышению показателей качества и достоверности сигналов СИВ за счёт применения новой элементной базы с использованием наноструктури-

рованных материалов, которая предполагает поиск решений следующих задач:

1) проектирования нового полупроводникового материала с заданными оптоэлектронными характеристиками;

2) расчёта показателей эффективности нового материала на объёмных кристаллах (микроэлектроника) и квантовых структурах (наноэлектроника) в виде количественных оценок повышения:

- а) коэффициента поглощения света;
- б) квантовой эффективности;
- в) чувствительности;
- г) отношения сигнал/шум;

3) оценки повышения качества сигналов СИВ за счёт нового полупроводникового материала в виде расчётов:

- а) вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$  на выходе ФП;
- б) величины выигрыша по параметру  $\delta^2_{\text{ан}}$ ;
- в) величины выигрыша по параметру  $\delta^2_{\text{фс}}$ ;



г) величины выигрыша по параметру  $\delta_\varepsilon^2$  для наихудших условий (с/ш).

4) оценки повышения достоверности сигналов СИВ за счёт нового материала с помощью расчёта вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{пр.обн.}}$ .

## ОБОСНОВАНИЕ ФУНКЦИИ ПОТЕРЬ

В качестве функции потерь принята величина экономического ущерба, который наступает в результате пропуска или ложного обнаружения опасного объекта. Анализ всех возможных вариантов аварийных ситуаций на переездах, касающихся расчёта вероятностей пропуска и ложного обнаружения, показал, что самыми опасными являются те случаи, когда сигнал от СИВ поступил (или не поступил) в момент, когда торможение возможно только в экстренном режиме. Торможение в экстренном режиме — это особый процесс, который строго регламентируется служебными инструкциями [13].

При поступлении от СИВ ложного сигнала о наличии опасного объекта машинист применяет экстренное торможение. В случае пропуска системой опасного объекта машинист не имеет информации о ситуации на переезде и не может немедленно включить режим экстренного торможения и, как следствие, происходит наезд на объект. При сближении с объектом процесс торможения происходит в другом более безопасном для пассажиров режиме.

В таблице 1 приведено описание опасных случаев с подвижным составом в виде наездов и экстренного торможения в результате которых железная дорога будет нести большие экономические убытки [14, с. 12–13].

Максимальные значения вероятностей пропуска  $P_{\text{пр.}}$  и ложного обнаружения  $P_{\text{л.обн.}}$  и минимальное значение вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{пр.обн.}}$  определяют следующим образом:

$$P_{\text{пр.}} = \frac{Q_{\min}}{\kappa \cdot Q_{\text{пр.}}}; \quad (1.1)$$

$$P_{\text{пр.обн.}} = 1 - P_{\text{пр.}}; \quad (1.2)$$

$$P_{\text{лож.обн.}} = \frac{Q_{\min}}{l \cdot Q_{\text{лож.обн.}}}, \quad (1.3)$$

где  $Q_{\min}$ ,  $Q_{\text{пр.}}$ ,  $Q_{\text{лож.обн.}}$  — расходы соответственно минимальные, при пропуске, при ложном срабатывании;

$\kappa$ ,  $l$  — среднее число соответственно пропусков (наездов) и ложных торможений для одной дороги за год.

Расчёты показали следующие значения вероятностей:

$$\begin{aligned} P_{\text{пр.}} &= 0,0007; \\ P_{\text{пр.обн.}} &= 1 - P_{\text{пр.}} = 0,9993; \\ P_{\text{л.обн.}} &= 10^{-4}. \end{aligned}$$

Таким образом, системы видеонаблюдения, используемые для повышения безопасности движения, должны обеспечить показатели эффективности  $P_{\text{пр.обн.}} \geq 0,9993$ ;  $P_{\text{л.обн.}} \leq 10^{-4}$ .

## РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА СИГНАЛОВ СИВ

Безопасность движения поездов во многом определяется результатом работы устройства распознавания опасных объектов СИВ. Результат распознавания образа в видеосервере СИВ зависит от многих факторов: качества формирования цифрового сигнала на передающей стороне (разрешения фотосенсора видеокамеры, погрешностей цифрового преобразования, погодных условий, освещённости, посторонних источников света и т.д.), помех и искажений в линии связи, шумов фотоприёмника и погрешностей интерполяции на приёмной стороне, алгоритма распознавания. Большинство из этих факторов вызывают искажения видеосигнала, которые можно оценить показателем качества в виде приведённой к мощности полезного сигнала дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$  на входе устройства распознавания СИВ [12; 15, с. 12]:

$$\delta_\varepsilon^2 \approx \delta_{\text{фс}}^2 + \delta_{\text{ан}}^2. \quad (2)$$

Основной причиной погрешностей, вносимых фотосенсором, является цифровой шум [16, с. 400]. Поэтому влияние внутреннего шума пикселей необходимо анализировать с учётом цифровой обработки видеосигнала.

Особенности работы ФС заключаются в том, что внутренние шумы пикселей складываются с фототоком видеоизображения. После процесса дискретизации непрерывного сигнала амплитуда им-



пульсов состоит из суммы сигнала  $\lambda$  и шума  $h$ . Положительная разность между суммой  $(\lambda + h)$  и ближайшим целым числом (уровнем квантования) может быть меньше половины шага квантования  $(\Delta_{\text{кв}}/2)$ . В случае округления в меньшую сторону (по правилам арифметического округления) шум отбрасывается. В других вариантах соотношений сигнала и шума могут происходить аномальные ошибки, т.е. ошибки в присвоении номера уровня квантования. Величину аномальной ошибки  $\delta_{\text{фс}}^2$  при условии гауссовского распределения плотности вероятностей фототока можно рассчитать следующим образом [15, с. 13]:

$$\delta_{\text{фс}}^2 \approx 12 \cdot \left[ \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{9\rho_{\text{вых.фс}}^2}{2L_{\text{кв}}^2}\right) \right], \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{вых.фс}}^2 = \frac{\sigma_{\lambda}^2}{\sigma_h^2}$  — отношение мощностей

фототока и шума на выходе фотосенсора и входе устройства аналого-цифрового преобразования АЦП;

$L = a^K$  — количество уровней квантования;

$a$  — разрядность кода;

$K$  — число разрядов в кодовой комбинации.

Для расчёта значений аномальной погрешности на выходе фотоприёмника  $\delta_{\text{ан}}^2$  можно воспользоваться методом вычисления вероятности ошибки при приёме элементарного импульса на основе анализа  $Q$ -фактора [17, с. 96], зависящего от отношения мощностей сигнала и шума на выходе ФП  $\rho_{\text{вых.фп}}^2$ .

Величина аномальной ошибки на выходе ФП для гауссовского распределения плотностей вероятностей сигнала рассчитывается по формуле [18, с. 392]:

$$\delta_{\text{ан}}^2 = 12 \cdot \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{\text{вых.фп}}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{\text{вых.фп}}^2}{8}\right). \quad (4)$$

Отсюда выражение приведённой дисперсии суммарной погрешности СИВ равно (1):

$$\delta_{\text{с}}^2 \approx 12 \cdot \left[ \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{9\rho_{\text{вых.фс}}^2}{2L_{\text{кв}}^2}\right) + \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{\text{вых.фп}}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{\text{вых.фп}}^2}{4}\right) \right]. \quad (5)$$

Составляющие (2), (3) приведённой дисперсии суммарной погрешности (4) имеют разный вес, зависящий от отношения мощностей сигнала и шума на выходе ФС и ФП.

## РАСЧЁТ КРИТЕРИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ СИГНАЛОВ СИВ

Критерий достоверности оценивается с помощью вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{пр.обн.}}$  согласно алгоритму Неймана—Пирсона.

Вероятность правильного обнаружения на выходе устройства обнаружения СИВ, реализованного в виде согласованного фильтра, рассчитывается следующим образом [12, с. 12; 18, с. 173]:

$$P_{\text{пр.обн.}} = V \left[ \frac{H}{\sqrt{2/\delta_{\text{с}}^2}} - \sqrt{2/\delta_{\text{с}}^2} \right], \quad (5)$$

где  $V(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-z^2/2} dz$  —

табличный интеграл.

Алгоритм расчёта следующий:

а) задаётся вероятность ложного обнаружения;

б) по табличному интегралу  $V(x)$  находится порог срабатывания приёмного устройства  $H$  с учётом отношения мощностей сигнала и шума  $\alpha_{\text{обн}}^2$ ;

в) по формуле (5) определяется вероятность  $P_{\text{пр.обн.}}$ .

Отношение мощностей сигнала и шума  $\alpha_{\text{обн}}^2$  (с/ш) есть величина, обратная приведённой дисперсии суммарной погрешности  $(\alpha_{\text{обн}}^2 = \frac{1}{\delta_{\text{с}}^2})$ .

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Улучшение качества видеосигналов возможно путём снижения тепловых шумов и повышение чувствительности оптоэлектронных устройств (ОЭУ), лежащих в основе ФС и ФП. Такой результат достигается за счёт применения элементной базы нового поколения. Главное отличие таких ОЭУ — использование наноструктурированных материалов, предварительно очищенных от тяжёлых изотопов. Эффективность изотопической очистки можно оценить на примере наиболее распространённых

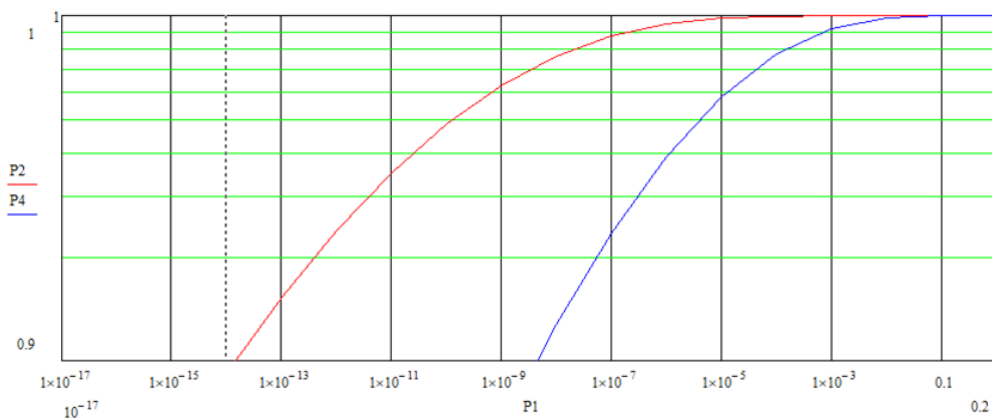


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного обнаружения от вероятности ложного обнаружения  $P_{\text{пр.обн.}} = f(P_{\text{л.обн.}})$ .

соединений, а именно, твёрдых растворов на основе арсенида галлия. Известно, что изотопическая очистка полупроводникового кремния позволила повысить быстродействие микропроцессоров более чем в два раза [19, с. 409]. Большого эффекта можно ожидать от изотопической очистки твёрдых растворов из арсенида галлия, т.к. галлий легче кремния (отношение эффективных масс электронов

$$\frac{m_{eSi}}{m_{eGa}} = \frac{0,19m_0}{0,067m_0} = 2,84.$$

Основным показателем улучшения качества ФС и ФП за счёт очистки полупроводникового материала от тяжёлых изотопов является повышение чувствительности  $R_i$  ОЭУ. Чувствительность напрямую связана с квантовой эффективностью материала  $\eta$ , зависящей от  $n$  (концентрации тяжёлых изотопов), и коэффициентом поглощения света  $\alpha$  [16, с. 393, 399].

Как показали исследования, повышение квантовой эффективности увеличит чувствительность  $R_i$  оптоэлектронного устройства (соответственно ФС или ФП) на полупроводниковом кристалле в 1,23 раза, на квантовой яме в 1,325 раз. Соответственно уменьшится мощность теплового шума, увеличится отношение сигнал/шум на выходе ОЭУ.

Так, значение  $\rho^2_{\text{вых.фс.}}$  для пикселей на объёмном кристалле из арсенида галлия увеличится в 1,23 раза, что значительно

уменьшит величину приведённой дисперсии текущей погрешности ФС  $\delta^2_{\text{фс}}$ .

Аналогично увеличится отношение мощностей сигнала и шума  $\rho^2_{\text{вых.фп}}$  на выходе фотоприёмника на множественных квантовых ямах (МКЯ) после изотопической очистки материала. Величина  $\rho^2_{\text{вых.фп}}$  повысится в 1,255 раза. Этот факт отразится на значении приведённой дисперсии аномальной ошибки  $\delta^2_{\text{ан}}$  ФП, а также приведённой дисперсии суммарной погрешности  $\delta^2_{\Sigma}$  и вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{пр.обн.}}$  устройством распознавания объекта СИВ. Так, улучшение оптоэлектронных характеристик материала ФС и ФП позволит уменьшить приведённую дисперсию суммарной погрешности более чем в 5,76 раза.

Рассчитанный выигрыш по отношению мощностей сигнала и шума на входе устройства распознавания приводит к увеличению вероятности правильного обнаружения, уменьшению вероятности ложного обнаружения опасных объектов и повышению безопасности движения поездов.

На рис. 2 представлены две зависимости  $P_{\text{пр.обн.}} = f(P_{\text{л.обн.}})$  вероятности правильного обнаружения ( $P_{2,4}$ ) от вероятности ложного обнаружения ( $P_3$ ).

Вероятности рассчитаны для случая использования согласованных фильтров в качестве устройств распознавания по критерию Неймана–Пирсона для вариантов ОЭУ без очистки полупроводнико-





вого материала ( $P_2$ ) и с очисткой ( $P_4$ ). Как видно из графиков, изотопическая очистка материала даёт значительное повышение вероятности  $P_{\text{пр.обн.}}$  и уменьшение вероятности  $P_{\text{л.обн.}}$ .

Так, полученное выше увеличение отношения мощностей сигнала и шума в 5,76 раз после очистки материала пикселей ФС и ФП увеличивает  $P_{\text{пр.обн.}}$  более чем на порядок, и уменьшает  $P_{\text{л.обн.}}$  на три порядка. Расчёты показали (рис. 2), что необходимые для предотвращения аварий вероятности ложного срабатывания  $P_{\text{л.обн.}} = 10^{-4}$  и правильного обнаружения  $P_{\text{пр.обн.}} = 0,9993$  можно обеспечить только с помощью новой элементной базы электроники.

## ВЫВОДЫ

1. Как показывает зарубежный и отечественный опыт, СИВ успешно используются для многих функций на ж.д. транспорте: охрана объектов, пожарная безопасность, выявление преступников в местах скопления пассажиров. Но для функции повышения безопасности движения необходимо повышение показателей качества и достоверности сигналов (критериев соответствия).

2. Для повышения показателей качества и достоверности сигналов СИВ необходимо улучшать оптоэлектронные характеристики ОЭУ путём использования наноструктурированного материала нового поколения.

3. Повышение безопасности движения поездов с помощью СИВ зависит от вероятностей правильного  $P_{\text{пр.обн.}}$  и ложного обнаружения  $P_{\text{л.обн.}}$ , которые определяются величиной приведённой дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\Sigma^2$  СИВ. Эффективность СИВ, оцениваемая в виде показателей качества ( $\delta_\Sigma^2$ ) и достоверности ( $P_{\text{л.обн.}}$ ) улучшаются с помощью ОЭУ нового поколения соответственно более чем в 5,76 раз и  $10^3$  раз.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Астапенко Е. В России увеличилось количество ДТП на железнодорожных переездах. 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.kolesa.ru/news/v-rossii-uvlechilos-kolichestvo-dtp-na-zh-d-pereezdah>. Доступ 21.10.2019.
2. Соловьёв А. Е. Виды аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте и их причины // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2005. — № 5. — С. 156–159.

3. Журавлёва Л. М., Богачёв А. П., Яцкивский Н. В. Снижение аварийных рисков с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения // Мир транспорта. — 2017. — № 3. — С. 206–212.

4. Журавлёва Л. М., Ивашевский М. Р., Ефимова Н. О., Яцкивский Н. В. Оценка качества передачи сигналов систем интеллектуального видеонаблюдения // Проектирование и технология электронных средств. — 2017. — № 3. — С. 10–15.

5. Хрулев А. А. Интеллектуальная система видеонаблюдения в составе комплексной системы безопасности на метрополитене // Системы безопасности. — 2014. — № 2. — С. 40–44.

6. Charles Chen, Harry Hsiao. How to Make Railroad Crossings Safer and Smarter. [Электронный ресурс]: <https://ohsonline.com/Articles/2017/03/01/How-to-Make-Railroad-Crossings-Safer-and-Smarter.aspx>. Доступ 30.10.2019.

7. Пресс-релиз компании Amplicon. Cutting-edge CCTV Level Crossing Surveillance System for Network Rail, 2019. [Электронный ресурс]: <https://www.amplicon.com/projects/cutting-edge-cctv-level-crossing-surveillance-system-network-rail/>. Доступ 30.10.2019.

8. Turcu, T. Video surveillance of level crossings. [Электронный ресурс]: <https://www.railwaypro.com/wp/video-surveillance-of-level-crossings>. Доступ 30.10.2019.

9. Гапанович В. Цифровая железная дорога: настоящее и будущее. [Электронный ресурс]: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1348652>. Доступ 30.10.2019.

10. Журавлёва Л. М., Богачёв А. П., Яцкивский Н. В., Журавлёв О. Е. Использование систем интеллектуального видеонаблюдения // Автоматика, связь, информатика. — 2017. — № 9. — С. 13–15.

11. Орлов С. Видеоаналитика: задачи и решения // Журнал сетевых решений LAN. — 2014. — № 6. — С. 24–29.

12. Журавлёва Л. М., Ивашевский М. Р., Яцкивский Н. В., Мягков Я. Ю. Качество сигналов систем интеллектуального видеонаблюдения // Автоматика, связь, информатика. — 2018. — № 2. — С. 2–5.

13. Распоряжение ОАО «РЖД» от 12 декабря 2017 г. № 2580р «О вводе в действие Регламента взаимодействия работников, связанных с движением поездов, с работниками локомотивных бригад при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций на путях общего пользования инфраструктуры ОАО «РЖД».

14. СТО «РЖД» 1.02.003-2006. Методика оценки эффективности мероприятий по повышению безопасности движения поездов.

15. Журавлёва Л. М., Ивашевский М. Р., Курьянцев Д. Г., Лошкарёв В. Л. Повышение качества сигналов системы интеллектуального видеонаблюдения // Проектирование и технология электронных средств. — 2018. — № 1. — С. 10–15.

16. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника — М.: Техносфера, 2006. — 588 с.

17. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. — М.: Солон-Пресс, 2004. — 261 с.

18. Горелов В. Г., Фомин А. Ф., Волков А. А. и др. Теория передачи сигналов. — М.: Маршрут, 2012. — 415 с.

19. Богданова В. А., Давлеткильдеев Н. А., Семиколонова Н. А., Сидоров Е. Н. Эффективная масса электронов в сильнолегированном арсениде галлия при упорядочении примесных комплексов // Физика и техника полупроводников. — 2002. — № 4. — С. 407–411.